

基于残余力向量法的基桩损伤诊断*

张 干¹, 熊洪峰², 张宝华¹, 崔衍强¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456;
2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 根据振动微分方程详细推导了残余力向量的表达式, 定义残余力向量的绝对值为结构的损伤指标。通过建立高桩码头基桩有限元模型, 运用残余力向量法对基桩进行损伤诊断数值模拟。数值模拟结果表明: 残余力向量作为诊断指标, 对结构的损伤较为敏感; 只需结构的低阶模态, 就可以准确快速地识别出结构的损伤。

关键词: 残余力向量; 基桩; 模态参数; 损伤诊断

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0061-04

Damage diagnosis for pile based on residual force vector

ZHANG Gan¹, XIONG Hong-feng², ZHANG Bao-hua¹, CUI Yan-qiang¹

(1. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Safety Ministry of Communications, Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: According to the vibration differential equation, the residual force vector expression was deduced in detail. As a structural damage index, the absolute value of the residual force vector was defined. By establishing high-piled wharf pile finite element model and using the residual force vector method, we carry out the numerical simulation for the pile of high-piled wharf damage diagnosis under a variety of conditions. The simulation results show that taking the residual force vector as diagnostic indicators are more sensitive to damage. The damage of structural can be identified quickly and accurately using low order modes parameters.

Keywords: residual force vector; foundation pile; modal parameters; damage diagnosis

基于动力特性的结构损伤诊断, 是通过对结构的动力响应进行分析, 达到识别结构是否存在损伤的目的, 它的基础为模态分析理论。由于动力特性的结构损伤诊断可以不受结构的规模和损伤所处位置的限制, 理论上只要在结构的不同位置布置传感器, 通过传感器获取结构因振动产生的动力响应参数, 分析结构的响应参数, 得到结构的模态参数, 利用结构的模态参数与结构本身的关系, 选择对结构损伤相对较为敏感的识别指标就可分析出结构的损伤。残余力向量法就是一

种基于动力特性的结构损伤诊断方法, 由 Ricles 在 20 世纪 90 年代提出, 自提出以来, 其概念明确, Ricles 等^[1] 和 Kahl 等^[2] 对残余力向量法进行了深入的研究。基于动力特性的结构损伤诊断, 目前在机械工程、航空航天等领域已经获得广泛的应用, 但在港口码头工程中, 国内外的研究成果还很少, 甚至还没有提出一种实用可行的诊断方法。因此, 基于动力的高桩码头基桩损伤诊断是一个全新的值得研究的方向^[3]。本文以一根单桩作为仿真实例, 验证了基于残余力向量的基桩

收稿日期: 2014-10-30

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51409134); 交通运输部建设科技项目 (201332849A090, 2014328224040)

作者简介: 张干 (1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为港工结构及检测评估。

损伤诊断研究的有效性。

1 残余力向量法的理论基础

基于残余力向量法的结构损伤诊断的理论是建立在结构振动响应理论基础之上的。根据振动理论,对于 n 个自由度的线性结构体系,其强迫振动的二阶微分方程可表示为:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \times \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \times \mathbf{u} = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为系统的质量矩阵; \mathbf{C} 为系统的阻尼矩阵; \mathbf{K} 为系统的刚度矩阵。 $\ddot{\mathbf{u}}$ 为加速度向量; $\dot{\mathbf{u}}$ 为速度向量; \mathbf{u} 为位移向量; $\mathbf{f}(t)$ 为外部激振向量。

若忽略结构阻尼对结构的影响,在自由线性振动时,具有 n 个自由度的系统自由振动方程为:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \times \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

解微分方程,式(2)可化成如下形式:

$$[\mathbf{K} - \omega_n^2 \times \mathbf{M}] \times \phi_n = 0 \quad (3)$$

式中: ω_n 为结构的固有频率; ϕ_n 为结构固有频率对应的振型。对损伤结构系统进行模态分析,可得到损伤结构各阶振动模态参数,即满足损伤结构系统的自由振动特征方程:

$$[\mathbf{K}_d - \omega_{dn}^2 \times \mathbf{M}_d] \times \phi_{dn} = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}_d 为结构损伤后的整体刚度矩阵; ω_{dn} 为结构损伤后第 n 阶固有频率也即特征方程的特征值; \mathbf{M}_d 为结构损伤后的整体质量矩阵; ϕ_{dn} 为结构损伤后第 n 阶固有频率对应的振型也即特征方程的特征向量。

假设结构在损伤后,系统仍满足线性振动的特性,且结构的损伤归结为质量的损失和结构刚度的降低。则损伤结构的刚度矩阵和质量矩阵与原始未损伤结构的刚度矩阵和质量矩阵的关系可表示为:

$$\mathbf{K}_d = \mathbf{K} + \Delta\mathbf{K} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_d = \mathbf{M} + \Delta\mathbf{M} \quad (6)$$

式中: $\Delta\mathbf{K}$ 为结构损伤引起的整体刚度矩阵的变化量; $\Delta\mathbf{M}$ 为结构损伤引起的整体质量矩阵的变化量。

将式(5)和(6)代入(4)中,可得:

$$[(\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K}) - \omega_{dn}^2(\mathbf{M} + \Delta\mathbf{M})] \phi_{dn} = 0 \quad (7)$$

如果忽略损伤对结构质量的影响,即 $\Delta\mathbf{M} = 0$,

则有:

$$[(\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K}) - \omega_{dn}^2 \times \mathbf{M}] \times \phi_{dn} = 0 \quad (8)$$

对式(8)进行整理有:

$$\Delta\mathbf{K} \times \phi_{dn} = -(\mathbf{K} - \omega_{dn}^2 \times \mathbf{M}) \times \phi_{dn} \quad (9)$$

定义残余力向量 \mathbf{R}_i 为:

$$\mathbf{R}_i = \Delta\mathbf{K} \times \phi_{di} = (\omega_{di}^2 \times \mathbf{M} - \mathbf{K}) \phi_{di} \quad (10)$$

式中: ω_{di} 为损伤结构的第 i 阶自振频率; ϕ_{di} 为损伤结构的第 i 阶振型。理论上讲,对于完好的结构系统, $\mathbf{R}_i = 0$, 即满足上述特征方程;当系统存在损伤时,其固有频率和对应的振型相对于完好的结构状态会发生改变,则 $\mathbf{R}_i \neq 0$, 因为 \mathbf{R}_i 具有力的量纲,因此定义 \mathbf{R}_i 为结构的第 i 阶残余力向量^[4,5], 即:

$$\mathbf{R}_i = (R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_n)_i^T \quad (11)$$

式中: i 为模态的阶数; j 为损伤结构的自由度序号,与特征值向量 ϕ_{di} 也即系统振型的自由度序号一致; n 为该结构系统的自由度总数。

2 损伤定位指标

在理想状态下,假设结构系统处于第 i 阶模态,将系统进行离散,当结构在某一单元处存在损伤时,则该单元对应自由度的残余力不为零,即表现为: $R_{ji} \neq 0$, 而离散结构在其他未损伤单元对应自由度上的残余力向量为零。因此,在第 i 阶模态下,当 \mathbf{R}_i 中某一节点自由度的残余力 R_{ji} 与零值相差较大时,则表明结构在该自由度对应的节点处存在损伤。由此可看出残余力向量 \mathbf{R}_i 对损伤单元的位置具有清晰的指示作用,通过计算残余力向量 \mathbf{R}_i 可以确定结构的损伤位置,并且由上述分析可知,只需系统的前几阶低阶模态就可以对结构的损伤进行诊断。

由于结构受环境噪声、测量误差及计算误差的影响,有些未损伤单元的残余力也不一定严格等于零,但其数值相对于损伤单元的残余力值还是相对较小的,因此对于这部分误差可以忽略不计。由振型数据的特点可知,计算得到的残余力

向量可能存在负值,故定义 $|\mathbf{R}_i|$ 为最终的损伤诊断指标,即: $|\mathbf{R}_i| = (|R_1|, |R_2|, \dots, |R_j|, \dots, |R_n|)_i^T$, $|\mathbf{R}_i|$ 为单元各自由度对应的残余力绝对值向量,根据残余力绝对值向量中元素值的大小即可推断出结构存在损伤,并由自由度的序号对应的节点来定位结构损伤所处的位置。

3 数值验证

3.1 单桩模型的建立

为了验证上述损伤诊断方法的可行性,考虑1根基桩来进行数值模拟,基桩的几何和材料参数如下:桩高3.0 m,桩的横截面边长均为0.08 m,桩的弹性模量取 2.7×10^4 MPa,桩的密度取 2.5 t/m^3 ,泊松比取0.167。在Ansys中Beam4是一种可用于承受拉、压、弯、扭的单轴受力单元,这种单元在每个节点上有6个自由度: x 、 y 、 z 方向的线位移和绕 x 、 y 、 z 轴的角位移。采用Beam4单元对基桩进行离散,基桩共离散为6个单元、7个节点,每个节点考虑6个自由度,即 UX 、 UY 、 UZ 和 $ROTX$ 、 $ROTY$ 、 $ROTZ$,共42个自由度。同时考虑到桩土相互作用时的复杂性和计算量,将基桩和土的边界条件按“嵌固点”理论来简化,即基桩与泥土接触部位为固定约束。在模态分析中认为结构某一单元的损伤只引起单元刚度的降低而不引起单元质量的改变,因此可以用降低弹性模量 E 值来模拟实际结构中的单元刚度的下降,即结构的损伤^[6-7]。记结构单元损伤后的弹性模量为 E^* ,则不同的 E^* 代表着不同程度的损伤。本模型即用改变离散结构单元的弹性模量来模拟离散单元的损伤。基桩结构离散后的单元位置见图1,单元和节点的对应关系见表1。

表1 单元节点及自由度编号

单元号	节点号	对应自由度号
1	1,2	1~12
2	2,3	7~18
3	3,4	13~24
4	4,5	19~30
5	5,6	25~36
6	6,7	31~42



图1 模拟损伤单元位置

3.2 单桩结构刚度的提取

在结构健康诊断、损伤识别等分析中,刚度矩阵的计算是有限元分析中的一个重要问题,获取的结构刚度矩阵的精确度直接关系到后续损伤诊断指标计算的正确性。获取结构的刚度矩阵主要有两种途径:单元刚度矩阵组装成结构总体刚度和通过有限元后处理直接提取结构总体刚度^[8-9]。在Ansys后处理中用HBMAT命令法来提取单桩的整体矩阵,用来计算单桩各节点自由度的残余力。

3.3 单桩残余力计算

在基桩的数值模拟中,通过改变离散结构单元的弹性模量来模拟离散单元的损伤,然后从有限元模型中提取结构各种工况下损伤时的模态参数(刚度矩阵、质量矩阵、频率和振型),代入基于Matlab编写的残余力计算程序中,计算出不同模态下的各自由度的残余力。

3.3.1 一阶模态下残余力计算

取4号单元损伤30%时(4号单元弹性模量降低30%),在一阶模态下计算基桩离散单元各自由度的残余力值,并画出残余力与自由度号对应关系(图2)。

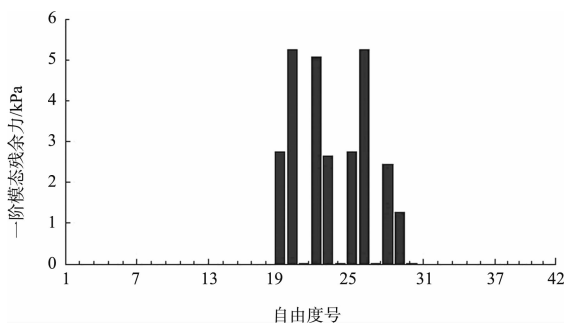


图2 单元4损伤30%时一阶模态下各自由度对应的残余力

3.3.1 三阶模态下残余力计算

取4号单元损伤30%时(4号单元弹性模量降低30%),在三阶模态下计算基桩离散单元各自由度的残余力值,并画出残余力与自由度号对应关系(图3)。

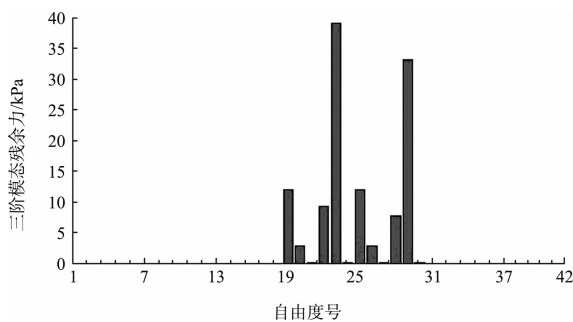


图3 单元4损伤30%时三阶模态下各自由度对应的残余力

根据表1单元节点及自由度对应可知,4号单元对应4、5号节点,对应的自由度序号为19~30号。由图2、3可知,在一阶模态和三阶模态两种工况下,基桩中残余力出现显著变化的自由度序号均为19~30号,故根据单元节点及自由度对应表可以判断出基桩的损伤位于第4号单元附近。由此表明,基于任意低阶模态参数计算得到的结构的残余力向量均能有效地识别出结构的损伤。

4 结论

1) 以残余力向量的绝对值作为损伤诊断的指标,对基桩进行了损伤诊断模拟。模拟的结果表明,残余力向量对结构的损伤较为敏感,通过计算损伤后的残余力能准确地识别出基桩损伤位置。

2) 分别计算了一阶和三阶模态下基桩损伤后的残余力向量绝对值,根据损伤诊断指标均能识别出基桩的损伤位置,表明基于结构任意的低阶模态参数,均可以实现对基桩损伤的识别。

3) 影响残余力向量识别精度的前提和关键在于结构模态参数(振型、刚度矩阵和质量矩阵)是否正确。较为直接有效的方法是建立结构的有限元模型,通过试验数据对有限元模型进行修正,在有限元分析中提取结构的模态参数。

参考文献:

- [1] Ricles J M, Kosmatka J B. Damage detection in elastic structures using vibratory residual forces and weighted sensitivity[J]. AIAA Journal, 1992, 30(9): 2 310-2 316.
- [2] Kahl K, Sirkis J S. Damage detection in beam structures using subspace rotation algorithm with strain data[J]. AIAA Journal, 1996, 34(12): 2 609-2 614.
- [3] 张干, 赵冲久, 孙熙平. 高桩码头基桩动力损伤诊断方法研究综述[J]. 水道港口, 2012(5): 416-422.
- [4] 杨和振, 李华军, 黄维平. 基于动力响应测试的海洋平台结构损伤诊断[J]. 工程力学, 2003(S1): 636-642.
- [5] 袁颖, 林皋, 闫东明, 等. 基于残余力向量法和改进遗传算法的结构损伤识别研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(2): 224-230.
- [6] Wang Bo, He Wei. A new method based on matrix perturbation and improved residual force vector for structural damage detection[C]. 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009: 61-64.
- [7] Yun G J, Ogorzalek K A, Dyke S J, et al. A structural damage detection method based on subsetselection and evolutionary computation[C]. Proceedings of the 2008 Structures Congress, 2008: 24-26.
- [8] 杨和振. 环境激励下海洋平台结构模态参数识别与损伤诊断研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [9] 杨和振, 李华军, 王国兴. 海洋平台结构模态参数识别的仿真研究[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 75-80.

(本文编辑 武亚庆)